

Adam Gozdowiak, Ludwik Antal
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

ANALIZA PRACY ASYNCHRONICZNEJ TURBOGENERATORA

THE ANALYSIS OF THE TURBOGENERATOR ASYNCHRONOUS WORK

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki badań symulacyjnych utraty synchronizmu turbogeneratora z powodu odłączenia obwodu wzbudzenia. Przeanalizowano przypadek, w którym turbogenerator jest napędzany przez turbinę o momencie napędowym równym $0,4 M_N$. Uwagę skupiono na zjawiskach zachodzących w trudno dostępnym pomiarowo wirniku oraz na przebiegach napięcia na zaciskach twornika, prądu twornika oraz mocy bierniej pobieranej przez maszynę. Zbadano obciążenia różnych elementów konstrukcyjnych przy pracy asynchronicznej.

Abstract: An article presents the simulation results of the turbogenerator asynchronous work. The investigations concerned a case when the turbogenerator was driven by turbine with acceptable torque equal to $0,40M_N$. The great emphasis was placed on the phenomena existing in the rotor and waveform of the voltage terminal, stator current and reactive power taken from the power plant. The investigation shows which components are the most vulnerable in analyzed state.

Słowa kluczowe: turbogenerator, praca asynchroniczna, metoda elementów skończonych

Keywords: turbogenerator, asynchronous work, finite element methods

1. Wstęp

Asynchroniczna praca turbogenerators może pojawić się w sposób przypadkowy, bądź może być zastosowana celowo. Może być skutkiem awarii układu wzbudzenia lub celowych działań remontowych zapobiegających takiej awarii. W tym drugim przypadku istnieje możliwość usunięcia usterek w układzie wzbudzenia lub przełączenie zasilania wzbudzenia w stan rezerwowy. Odłączenie obwodów wzbudzenia nie stanowi dużego problemu przy stosunkowo niskiej generowanej mocy. Stosowanie pracy asynchronicznej turbogenerators ma uzasadnienie ekonomiczne. Unika się wówczas odłączenia turbogenerators od systemu i wyłączenia bloku energetycznego. A to redukuje koszty i zwiększa pewność zasilania odbiorców.

Nienormalny stan pracy jakim jest praca asynchroniczna stwarza pewne zagrożenia dla turbogenerators. Zakłócenie takie jest dopuszczalne przez pewien czas, po którym turbogenerator powinien wrócić do pracy synchronicznej. Przyjmuje się [1], że dla turbogenerators o mocy do 300 MW, stan pracy asynchronicznej jest dopuszczalny przez 15 minut przy dopuszczalnej generowanej mocy czynnej równej 40 % mocy znamionowej oraz przy uwzględnieniu, że prąd stojana nie przekracza 110 % prądu znamionowego. Dodatkowym czynnikiem ograniczającym pracę asynchroniczną jest napięcie na zaciskach twornika. Dopuszcza się

stan, w którym to napięcie nie spadnie poniżej poziomu $0,9U_N$ [8]. Zazwyczaj zagadnienia stabilności pracy turbogenerators są badane z wykorzystaniem uproszczonych modeli obwodowych, których parametry są transformowane transpozycją Parka do osi podłużnej d i poprzecznej q , najczęściej przy wykorzystaniu tylko jednego obwodu tłumiącego w osi podłużnej i poprzecznej [8,9]. W wyniku rozwiązywania równań strumieniowo-napięciowych otrzymuje się przybliżone przebiegi czasowe wielkości elektrycznych (napięcia, prądy, moce) oraz wielkości mechanicznych (prędkość, moment elektromagnetyczny). Rozwiązanie takich równań strumieniowo-napięciowych wraz z równaniem ruchu wirnika jest najczęściej stosowany do oceny stabilności synchronicznej [10], ale daje niezbyt dokładne odwzorowanie przebiegów dynamicznych w obwodzie wzbudzenia. Modelowanie turbogenerators w opisanym sposobie nie daje informacji o zjawiskach elektromagnetycznych zachodzących w czasie stanu nieustalonego w elementach tłumiących wirnika, które w istotny sposób wpływają na stabilność oraz kołysania wirnika. Polowobwodowa analiza zagadnień stabilności daje możliwość uzyskania informacji o zjawiskach zachodzących w obwodach wirnika i tym samym pozwala lepiej ocenić zagrożenia dla maszyny w anormalnych stanach pracy.

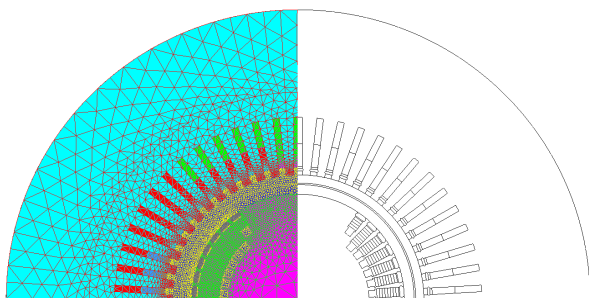
2. Model badanego turbogeneratora

Badaną maszyną jest 2-biegunowy turbogenerator, posiadający 54 żłobki w stojanie i uzwojenie połączone w dwie gałęzie równoległe. Dane znamionowe generatora zawiera tabela 1.

Tab. 1. Dane znamionowe badanego turbogenerators

Symbol	Wartość	Jednostka
S_N	500	MVA
U_{SN}	21	kV
I_{SN}	13,75	kA
$\cos\varphi_N$	0,80	-
I_{FN}	4,50	kA
n_N	3000	obr/min
M_N	1,273	MNm

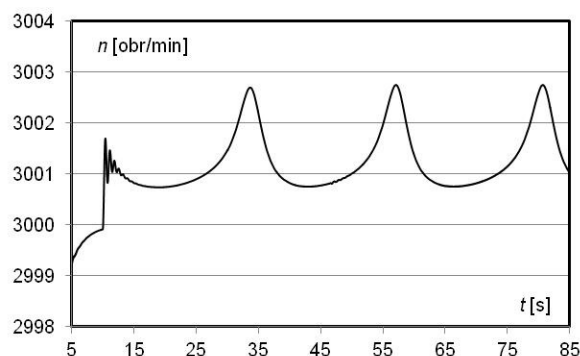
Model symulacyjny składa się z dwóch części, polowej oraz obwodowej. W części polowej uwzględniono rzeczywisty rozkład uzwojeń rozłożonych w żłobkach stojana i wirnika oraz obwody tłumiące w postaci klinów wirnika. Oprócz uwzględnienia nieliniowości charakterystyk magnesowania rdzeni stojana i wirnika, uwzględniono również zjawisko wypierania prądu w klinach wirnika oraz prądy wirowe indukowane w litej stali wirnika. Pominięto natomiast zjawisko wypierania prądu w uzwojeniach stojana i wirnika oraz prądy wirowe w pakiecie blach stojana. Przyjęte założenia w zadawający sposób odzwierciedlają zjawiska zachodzące w turbogeneratorze w stanach nieustalonych [2, 5, 6]. Model polowy pokazuje rysunek 1. Badana maszyna posiada jedną parę biegunów oraz dwuwarstwowe uzwojenie stojana. Model polowy w czasie obliczeń był sprzęgnięty z modelem obwodowym zawierającym elementy skupione, reprezentujące uzwojenia i obwody znajdujące się w części polowej oraz rezystancje i indukcyjności połączeń czołowych uzwojenia stojana i wirnika oraz klinów wirnika.



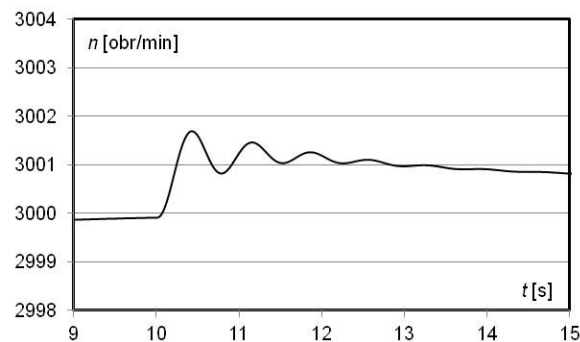
Rys. 1. Model polowy turbogenerators

3. Wyniki obliczeń symulacyjnych

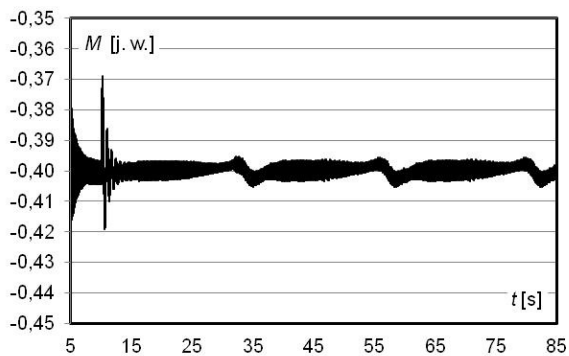
Przy pomocy opracowanego modelu polowo-obwodowego, zbadano symulacyjnie skutki zwarcia uzwojenia wirnika przy stałym momencie pochodzącym od turbiny, równym $0,4 M_N$. Przed przejściem do pracy asynchronicznej turbogenerator pracował przy znamionowym napięciu twornika oraz ze znamionowym współczynnikiem mocy. Zwarcie uzwojenia wirnika nastąpiło w dziesiątej sekundzie badanego przebiegu. Z obliczeń symulacyjnych wyznaczone zostały przebiegi prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego, napięcia i prądu twornika, prądu wzbudzenia, prądu w klinie wirnika oraz mocy biernej przedstawione na rysunkach 2-10.



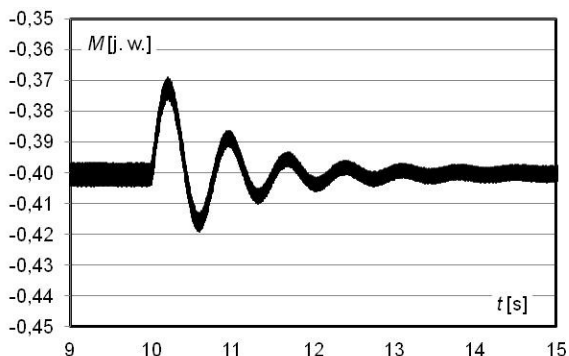
Rys. 2. Przebieg prędkości obrotowej



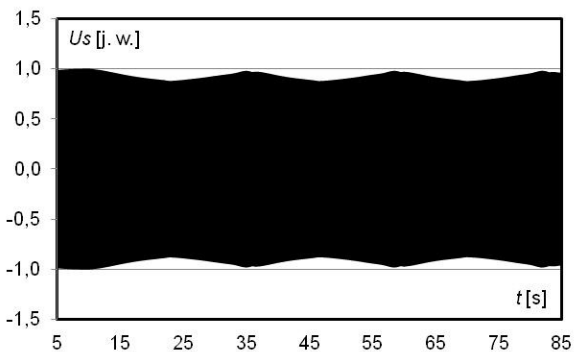
Rys. 3. Przebieg prędkości obrotowej w pierwszych chwilach zwarcia uzwojenia wirnika



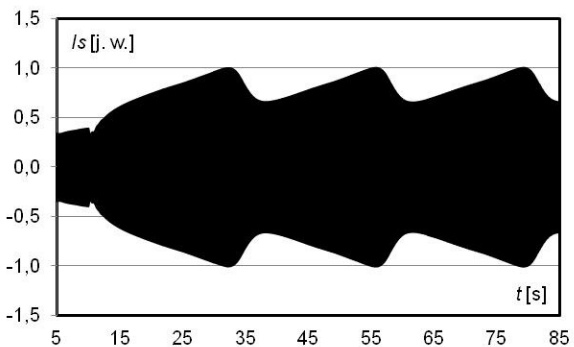
Rys. 4. Przebieg momentu elektromagnetycznego



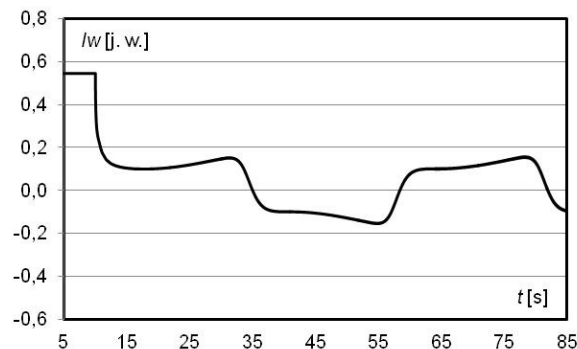
Rys. 5. Przebieg momentu elektromagnetycznego w pierwszych chwilach zwarcia uzwojenia wirnika



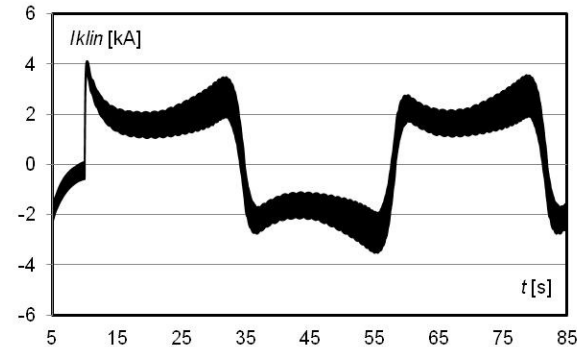
Rys. 6. Przebieg napięcia na zaciskach twornika



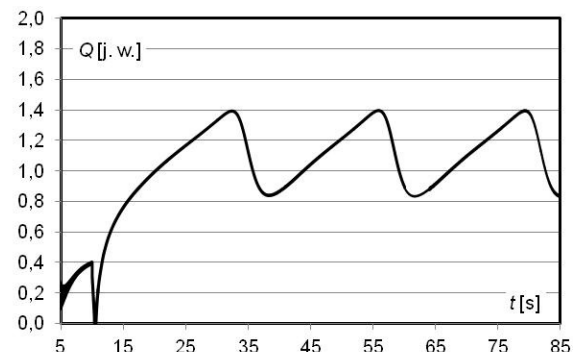
Rys. 7. Przebieg prądu stojana



Rys. 8. Przebieg prądu w uzwojeniu wzbudzenia



Rys. 9. Przebieg prądu w klinie wirnika



Rys. 10. Przebieg mocy biernej

Z przytoczonych przebiegów wynika, że praca asynchroniczna przy $M=0,4 M_N$ nie stanowi zagrożenia dla turbogeneratora. Wyznaczone amplitudy prądów są niższe od dopuszczalnych wartości przewidzianych przez producenta dla pracy ciągłej. Niekorzystnym skutkiem pracy asynchronicznej turbogeneratora jest pobór znacznej mocy biernej z systemu elektroenergetycznego w celu magnesowania obwodów magnetycznych. W omawianym przypadku wartość pobieranej mocy biernej wahała się między 245, a 420 MVar. W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń dla 4 różnych momentów napędowych. W każdym przypadku turbogenerator przed zwarcie uzwojenia wirnika pracował przy znamionowym napięciu twornika i znamionowym współczynniku mocy.

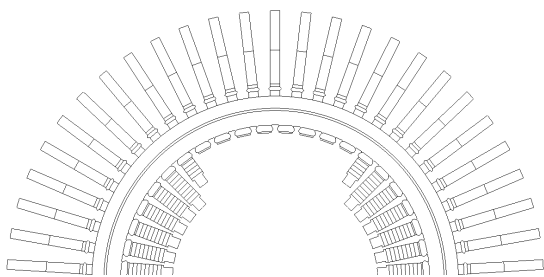
Tab. 2. Porównanie wartości maksymalnych z symulacji dla 4 różnych momentów napędowych: 0,4; 0,5; 0,75 oraz 1,0M_N

Symbol	0,4M _N	0,5M _N	0,75M _N	1M _N
I _{S_MAX} /I _{SN} [j. w.]	1,00	1,05	1,38	1,77
Q _{POB_MAX} /Q _N [j. w.]	1,40	1,59	2,00	2,51
I _{W_MAX} /I _{WN} [j. w.]	0,15	0,19	0,29	0,39
I _{KLIN_MAX} [kA]	3,5	4,2	6,0	8,0
U _{S_MIN} /U _{SN} [j. w.]	0,90	0,90	0,89	0,89
n _{max} [obr/min]	3002,8	3003,6	3006,7	3012,1

4. Możliwość ograniczenia poboru mocy biernej

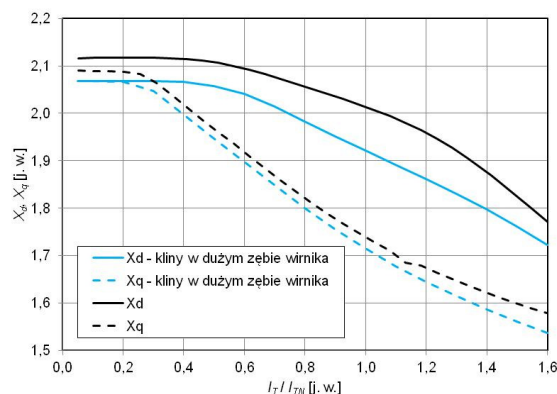
Duże oscylacje pobieranej mocy biernej pojawiające się podczas pracy asynchronicznej turbogeneratorsa wynikają z różnicy reluktancji w dwóch prostopadłych osiach maszyny. Różnice wartości reluktancji wzrastają wraz ze wzrostem obciążenia, ponieważ wzrasta nasycenie rdzenia stojana i wirnika. W celu zmniejszenia różnic w osi podłużnej i poprzecznej, wprowadzono kliny do dużego zęba wirnika o podziałce takiej samej jak podziałka żłobkowa wirnika. Widok zmodyfikowanego modelu połowego przedstawiono na rysunku 11.

Rozwiązanie to przyczyniło się do wzrostu nasycień rdzenia wirnika w osi podłużnej, a tym samym współczynnik zwarcia wzrósł o 4,2% (z 0,499 do 0,520).



Rys. 11. Zmodyfikowany model połowy turbogeneratorsa o dodatkowe kliny wirnika

Wykorzystując rozkład pól magnetostatycznych wyznaczono wartości reaktancji oddziaływania twornika w osi podłużnej i poprzecznej dla różnych wartości prądu stojana, a następnie do nich dodano wartość reaktancji rozproszenia czoł uzwojenia stojana [3,7]. Otrzymane wyniki pokazano na rysunku 12.



Rys. 12. Zależność reaktancji synchronicznej podłużnej i poprzecznej od wartości prądu twornika

Dodanie dodatkowych klinów w dużym zębie wirnika przyczyniło się do zmniejszenia oscylacji pobieranej mocy biernej z poziomu Q_{MAX}=1,40Q_N do 1,30Q_N oraz Q_{MIN}=0,83Q_N do 0,92Q_N. Prąd przepływający przez pojedynczy klin w części aktywnej zmalał z 3,50 do 2,57 kA. Nie odnotowano natomiast znaczących różnic w maksymalnej wartości prądu w uzwojeniu wirnika oraz prądu i napięcia twornika.

5. Podsumowanie

Praca asynchroniczna przy M=0,4 M_N nie stanowi zagrożenia termicznego dla wirnika turbogeneratorsa. Głównym czynnikiem ograniczającym pracę asynchroniczną jest znaczny pobór mocy biernej z systemu elektroenergetycznego, który jest większy od znamionowej mocy biernej generowanej przez turbogeneratorsa do systemu elektroenergetycznego w znamionowych warunkach pracy. Można się jednak spodziewać większych przyrostów temperatur w skrajnych częściach stojana wywołanych pojawieniem się składowej przeciwnej prądu stojana.

Prądy w przewodzących częściach wirnika nie przekraczają dopuszczalnych długotrwałych wartości zalecanych przez producenta.

Pobierana moc bierna z systemu elektroenergetycznego podlega znacznym oscylacjom, które wynikają z różnicy reluktancji w dwóch osiach turbogeneratorsa: podłużnej i poprzecznej. Oscylacje mogą być ograniczone przez zmniejszenie reluktancji w osi podłużnej. Możliwość taką dają dodatkowe kliny niemagnetyczne umieszczone w dużym zębie wirnika turbogeneratorsa.

Niewielkie oscylacje prędkości obrotowej wirnika wynikają z dużego momentu bezwładności turbozespołu.

6. Literatura

- [1]. Przybysz J., *Turbogeneratory*, Warszawa, IEN, 2011, 20-35.
- [2]. Kisielewski P., Antal L., *Model polowo-obwodowy turbogeneratorsa*, Prace Nauk. IMNiPE PWr, nr 59, SiM nr 26, 2006, 53–60.
- [3]. Berhausen S., Boboń A., *Polowa metoda wyznaczania parametrów i charakterystyk maszyny synchronicznej*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 91, 2011, 43-49.
- [4]. Kisielewski P., Antal L., *Reakcja wirnika turbogeneratorsa na zwarcia zacisków stojana*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr 87, 2010, 109-112.
- [5]. Kisielewski P., Antal L., *Zjawiska zachodzące w turbogeneratorsie przy udarowym zwarciu symetrycznym*, Prace Nauk. IMNiPE PWr, nr 59, SiM nr 26, 2006.
- [6]. Ban D., Žarko D., Maljkovic Z., *The application of finite element method for more accurate calculation and analysis of turbogenerator parameters*, Electric Power Components and Systems, Volume 26, Issue 10, 1998, 1081-1093.
- [7]. Machowski J., Bialek J. W., Bumby J. R., *Power system Dynamics, Stability and control*, John Wiley & Sons, Wiltshire, 2008.
- [8]. Kundur P., *Power system stability and control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [9]. Boboń A., Kudła J., Żywiec A., *Parametry elektromagnetyczne maszyny synchronicznej. Wykorzystanie metody elementów skończonych*, Monografia, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1998.

Autorzy

mgr inż. Adam Gozdowiak
dr hab. inż. Ludwik Antal, prof. PWr
Politechnika Wrocławska
Instytut Maszyn, Napędów
i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław
adam.gozdowiak@pwr.edu.pl
ludwik.antal@pwr.edu.pl